

激光二极管双端抽运 Tm:YLF 1.9 μm 激光器

段小明 姚宝权 贺万骏 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 报道了一种激光二极管(LD)双末端抽运 Tm:YLF 激光器,在 1.9 μm 处获得了连续波(CW)输出。1.9 μm 激光可用于抽运 Ho 晶体获得 2 μm 激光。在理论上,分析了掺 Tm³⁺ 激光器的运转机制和能量转换损耗,计算出 Tm:YLF 激光器在理论上的斜率效率达到 50%。在实验上,抽运源使用工作波长为 792 nm 的光纤耦合激光二极管,抽运光均分为两束双端抽运 Tm:YLF 晶体,两块晶体串接在折叠腔内。Tm:YLF 晶体的掺杂原子数分数为 4%,尺寸为 3 mm×3 mm×12 mm。测量了输出镜在不同透射率情况下激光器的输出激光波长,当输出镜透射率 $T=26\%$ 时,在 1.9 μm 处获得 20.1 W 的连续波激光输出,相应的抽运功率为 75 W,阈值抽运功率为 9 W,斜率效率为 34%,光-光转换效率为 27%。

关键词 激光技术; 红外固体激光器; Tm:YLF 激光器; 激光二极管抽运; 常温

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

Tm:YLF Laser at 1.9 μm Double-End Pumped by Laser Diode

Duan Xiaoming Yao Baoquan He Wanjun Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Continuous wave (CW) Tm:YLF solid laser at 1.9 μm using laser diode (LD) double-end pumping is reported. The mechanism of the Tm³⁺-doped laser and the energy conversion loss is analyzed theoretically. The slope efficiency of Tm:YLF laser calculated is 50%. In this experiment, fiber-coupled LD at 792 nm is used to pump the Tm:YLF crystal. The LD output is divided into two beams with the same power to the two double-end pumping crystal in a folded resonator. The Tm:YLF crystal with the dimension of 3 mm×3 mm×12 mm is doped with 4% Tm³⁺. The wavelength of the laser with different transmittances of output mirrors is measured. When the output mirror transmittance is 26%, the continuous wave output power of 20.1 W at 1.9 μm is obtained with 75W pumping power, and the threshold is 9 W. At the same time, the slope efficiency of 34% and the optical-to-optical efficiency of 27% are achieved.

Key words laser technique; infrared solid-state laser; Tm:YLF laser; laser-diode pump; room temperature

1 引 言

2 μm 波段高相干的辐射光源在激光测距、激光遥感、激光成像、光电对抗、医学诊断和治疗、科学仪器、材料处理、光学信号处理、数据处理、差分吸收激光雷达的环境监测等领域已显示出越来越广泛的应用前景。低温条件下工作的 Tm, Ho 双掺固体激光器是获得 2 μm 波段大功率激光输出的有效途径之一^[1~4]。但是在常温工作条件下, Tm, Ho 双掺晶体以难获得高功率的输出^[5]。然而,采用 Tm 激光抽

运掺 Ho 晶体的方案,能够在常温下获得大功率 2 μm 激光^[6,7]。

激光二极管(LD)抽运的固体激光器具有效率高、结构紧凑、性能稳定、寿命长以及光束质量好等优点^[8]。氟化钇锂晶体(YLF)分子式为:LiYF₄,属于四方晶系。这种晶体的特点是在紫外光谱区吸收损耗小,非线性折射系数小,非常适合于三价稀土金属离子(例如 Tm³⁺, Ho³⁺)的掺杂。掺有三价稀土离子的 YLF 晶体有较高的光存储容量。与 YAG

作者简介: 段小明(1981—),男,黑龙江人,博士研究生,主要从事固体激光器及非线性频率转换技术等方面的研究。

E-mail: dxm973@126.com

导师简介: 王月珠(1942—),女,辽宁人,教授,博士生导师,主要从事固体激光、光学参量振荡器等方面的研究。

E-mail: juyl@hit.edu.cn

晶体相比, YLF 晶体有较高的斜率效率和较低的阈值。在热稳定性方面, YLF 晶体比 YAG 晶体更好。在同样抽运条件下 YLF 的热透镜效应只有 YAG 的 $1/10^{[9]}$ 。Tm:YLF 晶体没有热致双折射, 上转换损耗小, 输出光线偏振, 其 σ 偏振光波长为在 $1.91 \mu\text{m}$ 附近, 与 Ho:YAG 晶体的吸收峰很好地重合 $^{[10]}$ 。并且, Tm:YLF 晶体在 800 nm 附近有很强的吸收, 适合于使用商用的激光二极管抽运。

2 理论分析

Tm 激光器属于准三能系统, 其运转机制如图 1 所示, 3H_6 态粒子吸收波长 792 nm 的抽运光激发到 3H_4 态。 3H_4 态粒子与其周围的 3H_6 态粒子发生弛豫。 3H_4 态粒子向下辐射到 3F_4 态, 产生的光子又同时将 3H_6 态粒子激发跃迁到 3F_4 态, 这样就产生了两个 3F_4 态粒子。这个过程有 25% 左右的能量转换成晶体热。 3F_4 态向 3H_6 跃迁就产生了 $1.9 \mu\text{m}$ 激光。

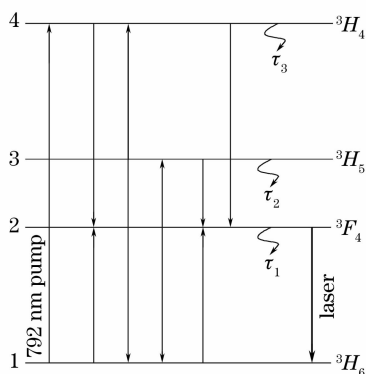


图 1 Tm 激光器的运转机制

Fig. 1 Schematic view of the energy processes involved in Tm lasers

在常温条件下, 存在 3F_4 态的上转换效应 ($^3F_4 \rightarrow ^3H_5$ 跃迁), 这导致 Tm 系统激光上能级粒子

数减少。同时, 3H_6 态粒子吸收激光光子返回 3F_4 , 这个过程称为再吸收。由于再吸收的存在, Tm 系统运行时就需要补偿被激光介质吸收的激光光子的能量, 目的是使晶体对其产生的激光是透明的, 这样就增大了抽运光的损耗。上转换效应和再吸收损耗会导致激光器转换效率下降, 通过选取合适的掺杂浓度、晶体长度以及降低晶体的温度可以有效地降低它们的影响。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示, 在谐振腔内串接两块 Tm:YLF 晶体, 两块晶体掺杂浓度和尺寸完全相同, 用激光二极管对每块晶体进行双末端抽运, 这种结构不仅能使晶体承受更高的抽运功率, 还可以有效地增加增益介质长度, 有利于激光器输出功率的提高。抽运源采用两个光纤耦合的激光二极管, 激光二极管的波长随其工作温度而变化, 变化幅度约为 $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 可以通过调节激光二极管的工作温度来微调其输出光的波长。LD①的输出功率为 60 W , 光纤芯径为 $400 \mu\text{m}$, 波长为 792 nm , LD②的输出功率为 20 W , 光纤芯径为 $200 \mu\text{m}$, 波长为 795 nm , 其工作在 10°C 左右时的波长为 792 nm 。每个激光二极管发出的抽运光首先经过一个焦距为 25 mm 的透镜变为平行光, 然后用一个 45° 对 792 nm 半透半反的平镜均分为两束。LD①的抽运光用焦距为 35 mm 的聚焦镜耦合入 Tm:YLF 晶体, LD②的抽运光用焦距为 75 mm 的聚焦镜耦合入 Tm:YLF 晶体。谐振腔由三个折叠镜, 一个平镜, 和一个平凹镜组成, 其中折叠镜为平面镜, 在 45° 对 792 nm 高透 $1.9 \mu\text{m}$ 高反, 全反镜为平镜, 在 0° 对 792 nm 高透 $1.9 \mu\text{m}$ 高反, 平凹镜为输出镜, 其曲率半径为 200 mm , 整个谐振腔的长度约为 173 mm 。

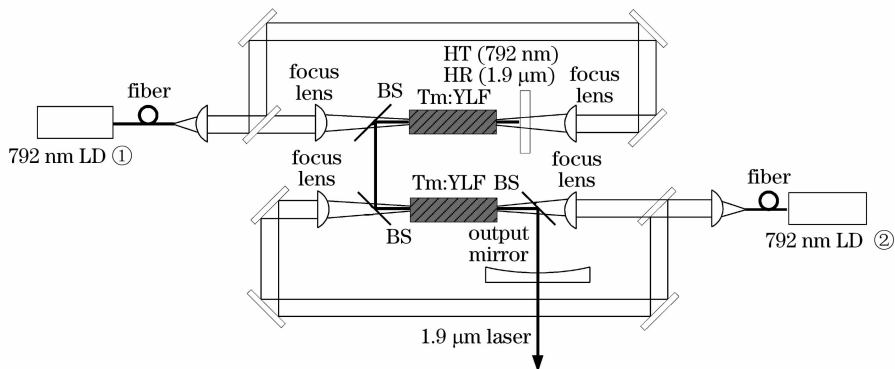


图 2 光纤耦合激光二极管抽运 Tm:YLF 激光器实验装置图

Fig. 2 Setup of fiber-coupled LD pumped Tm:YLF laser

Tm:YLF晶体装在由紫铜材料制作的热沉中,采用热电制冷方式对其进行控温,温度控制在 15 $^{\circ}\text{C}$ 。Tm:YLF晶体的掺杂原子数分数为4%, a 轴切割,外形尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 12 mm。晶体两个端面互相平行,并且抛光,两端面都镀有对 792 nm 减反、1.9 μm 高透膜。

Tm:YLF 激光器的斜率效率可表示为

$$\eta = \eta_a \eta_q \frac{T}{T+L} \frac{\nu_l}{\nu_p}, \quad (1)$$

式中 η_a 为抽运光的吸收效率, η_q 为 Tm 离子的量子效率, ν_l 为激光频率, ν_p 为抽运光频率, T 为输出镜的透射率, L 为谐振腔内的往返损耗。根据晶体端面的反射以及谐振腔内镜片的传输损耗估计 L 的

值在 6%左右, η_a 的值约为 71%, η_q 值约为 1.9^[11]。

4 实验结果与分析

在实验中使用北京光学仪器厂生产的 WDM1-3 型光栅单色仪测量了透射率分别为 5%, 9.5%、13.2% 和 26% 时 Tm:YLF 激光器的波长, 在光栅单色仪的出射狭缝端放置 PbS 探测器, 它采集到的信号输入到示波器中, 通过示波器观察信号。实验时转动光栅单色仪鼓轮, 当观察到信号时读出鼓轮读数即可得出波长值, 测量结果如图 3 所示。当输出镜透射率 $T=26\%$ 时, 激光器输出中心波长为 1907.6 nm, 谱线半峰全宽(FWHM)约为 2.8 nm。

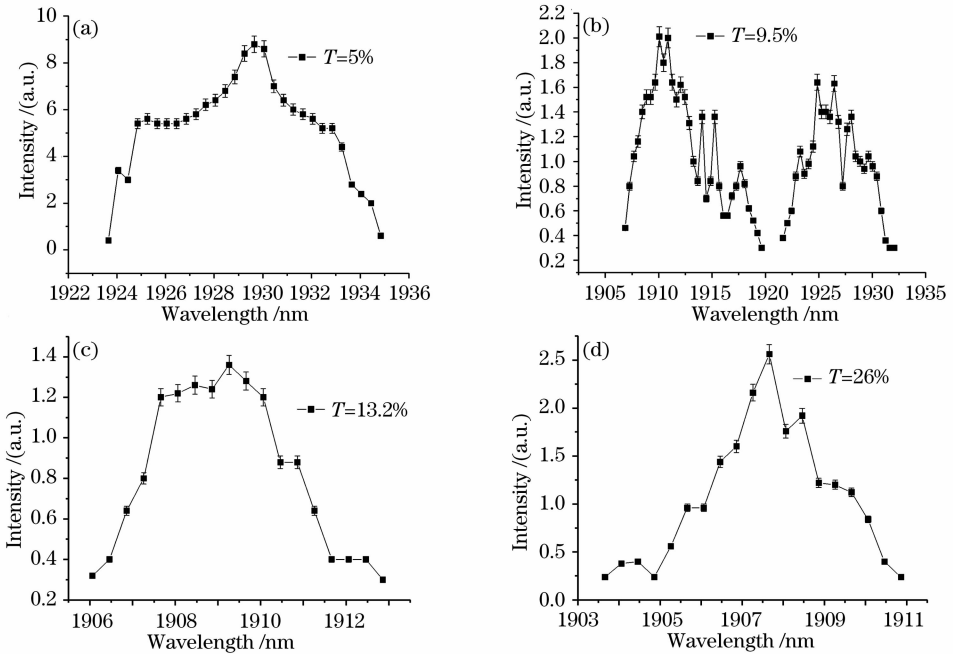


图 3 不同透射率下 Tm:YLF 激光器的输出波长

Fig. 3 Wavelength of Tm:YLF lasers with different transmittances

当输出镜透射率 $T=26\%$ 时, 使用 Coherent 公司的 Field Mate 功率计对激光器的输出功率进行测量, 结果如图 4 所示, 最大输出功率 20.1 W, 根据数据线性拟合出激光器的斜率效率为 34%, 在功率测量过程中, 待激光二极管的温度及 Tm:YLF 晶体的温度稳定后, 其输出功率的变化范围小于 0.02 W。用格兰棱镜测量输出激光的偏振态为线偏振光。

根据(1)式, 当 $T=26\%$ 时理论上激光器的斜率效率为 50%, 而在实验中测量得到的斜率效率为 34%, 二者之间的偏差主要有以下几方面的原因: 1) 组成谐振腔的三个 45 $^{\circ}$ 折叠镜有漏光问题, 增加了腔内损耗, 降低了斜率效率; 2) 抽运光与振荡光的耦合效果没有达到最佳; 3) 抽运光在传输过程中有损

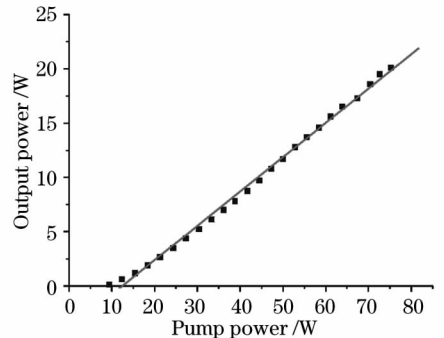


图 4 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power as a function of pump power
耗, 在拟合激光器的斜率效率时没有考虑到抽运光的传输损耗问题, 这就使按拟合的结果偏低; 4) 用

(1)式计算时使用的 Tm^{3+} 离子量子效率是理论值, 实际情况不会有那么高, 导致计算出来的斜率效率偏高。

晶体温度对激光输出存在影响, 为了定量研究晶体温度对激光输出特性的影响, 通过调节热电制冷片的电流来调节其制冷量, 从而调节晶体的温度。图 5 给出了抽运功率为 10.7 W 时, 输出功率随晶体温度的变化关系。

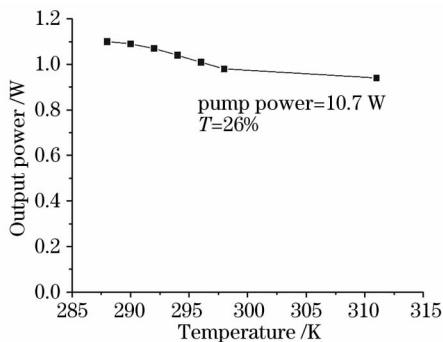


图 5 输出功率与温度的变化关系

Fig. 5 Output power versus the heat sink temperature

可见, 输出功率随晶体温度的升高而减小。这是由于激光晶体的准三能级特性, 当晶体的温度升高时, 所需要的抽运功率越大, 而且在一定的温度范围内, 多重态斯塔克(Stark)能级中激光上能级粒子数密度的数值随温度的增加而减小, 能量传递上转换系数变大, 能量传递上转换效应就越明显, 导致反转粒子数降低, 激光器阈值升高, 效率降低, 意味着激光器输出功率的下降。所以降低晶体的温度有利于降低激光器的阈值, 提高激光器的效率。

5 结 论

在常温条件下, 采用双激光二极管双端抽运两块 $Tm:YLF$ 晶体的结构, 对激光二极管抽运的 $Tm:YLF$ 激光器进行了实验研究。用光栅单色仪测量了不同透射率时激光器的输出光波长, 用格兰棱镜测量输出激光的偏振态为线偏振光。当激光器输出镜的透射率 $T=26\%$ 时, 获得了 20.1 W 连续激

光输出, 斜率效率为 34%, 光-光转换效率 27%。测得此时激光器的输出中心波长 1907.6 nm, 谱线半峰全宽约为 2.8 nm。实验证明, 随着晶体工作温度升高, 激光器输出功率有所下降。在实验中没有观察到激光器输出饱和现象, 如果使用更高功率的抽运源, 进一步优化抽运光与振荡光的耦合效率, 激光器的输出功率可进一步提高。

参 考 文 献

- 1 Yao Baoquan, He Wanjun, Zhang Xingbao *et al.*. High efficient CW $Tm, Ho:GdVO_4$ laser pumped by a diode[C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 179~183
- 2 Wan-Jun He, Bao-Quan Yao, You-Lun Ju *et al.*. Diode-pumped efficient $Tm, Ho:GdVO_4$ laser with near-diffraction limited beam quality[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11653~11659
- 3 Yao Baoquan, Li Yufeng, He Wanjun *et al.*. 10 W cryogenic cooling $Tm, Ho:YLF$ laser double-end-pumped by fiber-coupled laser diodes[C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 142~146
- 4 Wang Yuezhu, He Wanjun, Yao Baoquan *et al.*. $Tm, Ho:GdVO_4$ laser at 2 μm using laser-diode double-end pumping[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 730~733
王月珠, 贺万骏, 姚宝权等. 激光二极管双端面抽运 $Tm, Ho:GdVO_4$ 2 μm 激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 730~733
- 5 Xinlu Zhang, Youlun Ju, Yuezhu Wang. Diode-pumped single frequency $Tm, Ho:YLF$ laser at room temperature[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8): 463~465
- 6 P. A. Budni, L. A. Pomeranz, C. A. Mille *et al.*. CW and Q-switched $Ho:YAG$ pumped by $Tm:YALO$ [C]. *ASSL*, 1998, 204~206
- 7 Espen Lippert, Gunnar Rustad, Stephane Nicolas *et al.*. Fiber laser pumped mid-infrared source[C]. *SPIE*, 2004, **5620**: 56~58
- 8 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm $Nd:YVO_4$ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1069~1072
李海峰, 周睿, 赵璞等. 激光二极管端面抽运 $Nd:YVO_4$ 实现 1386 nm 连续波激光输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1069~1072
- 9 Norman P. Barnes, Elizabeth D. Filer, Clyde A. Morrison *et al.*. $Ho: Tm$ Lasers I: Theoretical[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(1): 92~103
- 10 P. A. Budni, C. R. Ibach, S. D. Setzler *et al.*. 50-mJ Q-switched 2.09- μm holmium laser resonantly pumped by a diode-pumped 1.9- μm thulium laser[J]. *Opt. Letters*, 2003, **28**(12): 1016~1018
- 11 S. So, J. I. Mackenzie, D. P. Shepherd *et al.*. A power scaling strategy for longitudinally diode-pumped $Tm:YLF$ lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **84**(3): 389~393